

АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛОТНОГО СЛОЯ НА КОНВЕЙЕРНЫХ ОБЖИГОВЫХ МАШИНАХ

Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.В. Луговкин, В.Ф. Ярчук

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
(г. Екатеринбург, Россия)

Приведены результаты проведенного анализа расчетных выражений, полученных разными исследователями, для определения величины гидравлического сопротивления плотного слоя, состоящего из различных видов частиц (шаровидные частицы, окатыши, частицы произвольной формы). В качестве критерия для выявления общих закономерностей зависимости гидравлического сопротивления слоя от температуры и скорости фильтрации был использован приведенный коэффициент гидравлического сопротивления. Показано, что на характер зависимости гидравлического сопротивления слоя от порозности практически не влияет форма частиц. Рекомендована формула, с помощью которой достаточно надежно можно рассчитывать коэффициент гидравлического сопротивления слоя окатышей при их естественной засыпке и отсутствии значительного количества мелочи, а, следовательно, определять потери энергии в самом слое и в целом по всему газовоздушному тракту обжиговых установок.

Ключевые слова: слой, частицы, окатыши, анализ, гидравлическое сопротивление, порозность, скорость фильтрации, потери энергии.

The results of the analysis of calculated expressions obtained by different researchers to determine the hydraulic resistance of the dense layer consisting of different types (spherical particles, pellets, particles of arbitrary shape) were presented. As a criterion to identify common patterns depending on the hydraulic resistance of the layer on the temperature and the rate of filtration the powered hydraulic resistance coefficient was used. It is shown that depending on the nature of the hydraulic resistance of the layer porosity hardly affects the shape of the particles. Recommended a formula by which you can reliably calculate the coefficient of hydraulic resistance of the pellet layer in their natural filling and the absence of a significant amount of detail, and therefore determine the energy loss in the layer and in general throughout the gas path in roasting plants.

Keywords: layer, particles, pellets, analysis, flow resistance, porosity, filtration rate, energy loss.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа расчетных выражений, используемых для определения гидравлического сопротивления слоя, состоящего из частиц разной формы, а также железорудных окатышей, и обоснование и выбор формулы, которая бы позволяла надежно рассчитывать эту величину, а также коэффициента гидравлического сопротивления, без которого невозможно определить близкие к реальным потери давления в слое.

Наиболее активно работы по определению гидравлического сопротивления плотного слоя, в том числе слоя из железорудных окатышей, проводились в 60–80 годы прошлого столетия [1–6]. В последнее время этим вопросам уделяется мало внимания.

Обычно выражения, предлагаемые различными авторами, для расчета гидравлического сопротивления слоя Δp , Па, могут быть записаны либо в виде известной формулы Дарси–Вейсбаха

$$\Delta p = \zeta_{\text{сл}} \frac{\rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2}{2} \frac{H}{d}, \quad (1)$$

либо в виде [1]

$$\Delta p = \zeta_{\text{сл}} \rho_{\text{г}} w_{\text{г}}^2 H, \quad (2)$$

где $\zeta_{\text{сл}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления; $\rho_{\text{г}}$ – плотность фильтрующей среды, кг/м³; $w_{\text{г}}$ – скорость фильтрации, м/с; H – высота слоя, м; d – размер частиц слоя, м; $C_{\text{сл}}$ – приведенный коэффициент гидравлического сопротивления, м⁻¹.

Введение приведенного коэффициента гидравлического сопротивления $C_{\text{сл}}$ можно оправдать тем, что коэффициент гидравлического сопротивления $\zeta_{\text{сл}}$ сам зависит от размера частиц d , хотя из формулы (1) этого не видно. В остальном введение коэффициента $C_{\text{сл}}$ ничего нового не вносит, так как имеется простая зависимость

$$C_{\text{сл}} = \zeta_{\text{сл}} / 2d. \quad (3)$$

Обрабатывая данные лабораторных исследований, одни авторы [1] считают коэффициент $\zeta_{\text{сл}}$ функцией только критерия Рейнольдса $\text{Re}_{\text{сл}} = wd/v$, не усматривая зависимости $\zeta_{\text{сл}}$ от порозности (или не усматривая зависимости последней от размера частиц d). Другие авторы находят, что порозность слоя m значительно зависит от d , и потому $\zeta_{\text{сл}}$ является функцией $\text{Re}_{\text{сл}}$ и m . Третьи авторы [4] отмечают зависимость m от d . Авторы работ [2, 7] считают, что при расчете гидравлического сопротивления слоя из любых частиц достаточно учитывать зависимость $C_{\text{сл}}$ (и, следовательно, $\zeta_{\text{сл}}$) только от размера частиц d , а зависимость $C_{\text{сл}}$ от скорости фильтрации, температуры, формы частиц, порозности (при естественной засыпке) можно пренебречь.

Так как окатыши имеют шаровидную форму, то представляется очевидным, что их гидравлическое сопротивление должно быть несколько выше, чем слоя шаров, и значительно ниже, чем слоя частиц неправильной формы. Более неопределенным является вопрос о том, как зависит гидравлическое сопротивление слоя окатышей (при естественной засыпке) от порозности и как зависит порозность от размера окатышей. В целях получения сравнимых данных были выполнены расчеты приведенного коэффициента $C_{\text{сл}}$ по данным ряда работ (табл. 1) для различных видов частиц (шаровидные частицы, окатыши, частицы произвольной формы). Порозность для всех расчетных выражений (табл. 1) принята в соответствии с выражением

$$m = 0,222d^{0,252}. \quad (4)$$

Таблица 1
Расчетные выражения для определения величины гидравлического сопротивления слоя по данным ряда авторов

Номер формулы	Вид частиц	Δp , Па	$\zeta_{\text{сст}}$	$C_{\text{сст}}$, м^{-1}	Источник
1	Шаровидные	$\Delta p = \zeta_{\text{сст}} \frac{\rho_{\text{т}} w_{\text{т}}^2}{2} \frac{H}{d}$	$\zeta_{\text{сст}} = \frac{1,53}{m^{4,2}} \left(0,3 + \frac{3}{\text{Re}_{\text{сст}}^{0,7}} + \frac{30}{\text{Re}_{\text{сст}}} \right)$ $\text{Re}_{\text{сст}} = \frac{0,45}{(1-m)\sqrt{m}} \text{Re}$	$C_{\text{сст}} = \frac{\zeta_{\text{сст}}}{2d}$	[8]
2	Куски произвольной формы	$\Delta p = \zeta_{\text{сст}} \frac{\rho_{\text{т}} w_{\text{т}}^2}{2} \frac{H}{d}$	$\zeta_{\text{сст}} = \frac{1,53}{m^{4,2}} \left(1 + \frac{15}{\text{Re}_{\text{сст}}^{0,5}} + \frac{75}{\text{Re}_{\text{сст}}} \right)$ $\text{Re}_{\text{сст}} = \frac{0,45}{(1-m)\sqrt{m}} \text{Re}$	$C_{\text{сст}} = \frac{\zeta_{\text{сст}}}{2d}$	[8]
3	Окашки (восстановленные)	$\Delta p = \lambda \frac{\rho_{\text{т}} w_{\text{т}}^2}{2} \frac{6(1-m)}{m^3} \frac{H}{d}$	$\lambda = \frac{3,9m^3}{(1-m)}, \text{Re}_{\text{к}} > \text{Re}_{\text{кр}}$ $\lambda = \frac{17,35m^{2,5}}{(1-m)^5 \text{Re}_{\text{к}}}, \text{Re}_{\text{к}} \leq \text{Re}_{\text{кр}}$ $\text{Re}_{\text{к}} = \frac{0,667}{(1-m)} \text{Re}_{\text{сст}}, \text{Re}_{\text{кр}} = 294000d$	$C_{\text{сст}} = \frac{3\lambda}{d} \frac{(1-m)}{m^3}$ $m = 0,222d^{0,252}$	—

4	Шаровидные	$\Delta p = \xi \frac{\rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2}{2} \frac{6(1-m)}{m^3} \frac{H}{d}$	$\xi = \frac{2,22}{Re_{\kappa}^{0,2}}$ $Re_{\kappa} = 45...4000$ $Re_{\kappa} = \frac{0,667}{(1-m)} Re_{\text{сн}}$	$C_{\text{сн}} = \frac{3\xi}{d} \frac{(1-m)}{m^3}$	[9]
5	Куски произвольной формы	$\Delta p = \xi \frac{\rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2}{2} \frac{77(1-m)}{m^3} \frac{H}{d}$	$\xi = \frac{211}{Re_{\kappa}} + 0,85$ $Re_{\kappa} = \frac{0,519}{(1-m)} Re_{\text{сн}}$ $Re_{\kappa} = 50...800$	$C_{\text{сн}} = \frac{3,85 \xi (1-m)}{d} \frac{1}{m^3}$	[10]
6	Куски произвольной формы	$\Delta p = C_{\text{сн}} \rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2 \frac{H}{d}$	—	$C_{\text{сн}} = \frac{0,15}{d^2} + 200$	[7]
7	Окатыши	$\Delta p = C_{\text{сн}} \rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2 \frac{H}{d}$	—	$C_{\text{сн}} = 141 \exp\left(\frac{0,021}{d}\right)$	[2]
8	Окатыши	$\Delta p = \zeta_{\text{сн}} \frac{\rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2}{2} \frac{H}{d}$	$\zeta_{\text{сн}} = \frac{100}{Re_{\text{сн}}^{0,214}}; Re_{\text{сн}} = \frac{w_{\Gamma} d}{\nu}$	$C_{\text{сн}} = \frac{\zeta_{\text{сн}}}{2d}$	[1]
9	Окатыши	$\Delta p = \zeta_{\text{сн}} \frac{\rho_{\Gamma} w_{\Gamma}^2}{2} \frac{H}{d}$	$\zeta_{\text{сн}} = \frac{3300}{Re_{\text{сн}}} + 16;$ $200 \leq Re_{\text{сн}} \leq 2000$	$C_{\text{сн}} = \frac{\zeta_{\text{сн}}}{2d}$	[11]

Результаты расчетов зависимости приведенного коэффициента $C_{сл}$ от размера частиц показаны на рис. 1 (скорость фильтрации $w_f = 0,6$ м/с, температура воздуха $t_f = 0$ °С). Номера кривых на рис. 1 (а также ниже на рис. 3) соответствуют номеру расчетного выражения по табл. 1. Обращает на себя внимание эквидистантность некоторых кривых (1; 2; 4; 5) на рис. 1, несмотря на то что соответствующие расчетные выражения получены авторами независимо друг от друга и для частиц разной формы (1, 4 – для частиц шаровой формы, 2, 5 – для частиц типа неправильных кусков). Эквидистантность кривых в полулогарифмических координатах соответствует эквипропорциональность соответствующих значений коэффициента $C_{сл}$ в обычных координатах. Это хорошо видно из табл. 2, где вычислены отношения $C_{сл}/C_{сл1}$ при разных размерах частиц слоя d . Приведенные коэффициенты $C_{сл}$, вычисленные по формулам (1), (2), (4) и (5), эквипропорциональны в диапазоне $d = 8 \dots 20$ мм с точностью до $\pm 3\%$. Это указывает на то, что характер зависимости коэффициента $C_{сл}$ от размера слабо зависит от рода частиц. Кроме того, эти кривые получены при условии, что порозность существенно меняется с изменением диаметра. Отсюда можно заключить, что зависимость коэффициента $C_{сл}$ от порозности примерно одинакова для частиц различной формы.

Кроме указанной группы кривых на рис. 1 есть еще одна группа примерно эквидистантных кривых в диапазоне $d = 12 \dots 24$ мм. Это кривые 3, 7, 8, 9, которые описывают зависимость $C_{сл} = f(d)$ для окатышей. Кривая 6 также может быть отнесена к этой группе, хотя авторы работы [7] отводят ей роль универсальной кривой, пригодной для расчета $C_{сл}$ во всех случаях (из рис. 1 видно, что кривые 2, 3, 5 отклоняются от кривой 6 на 200–300 %). Из этой группы относительно близких друг к другу ($d = 8 \dots 20$ мм) кривых резко выделяется кривая 3, полученная для слоя из восстановленных окатышей.

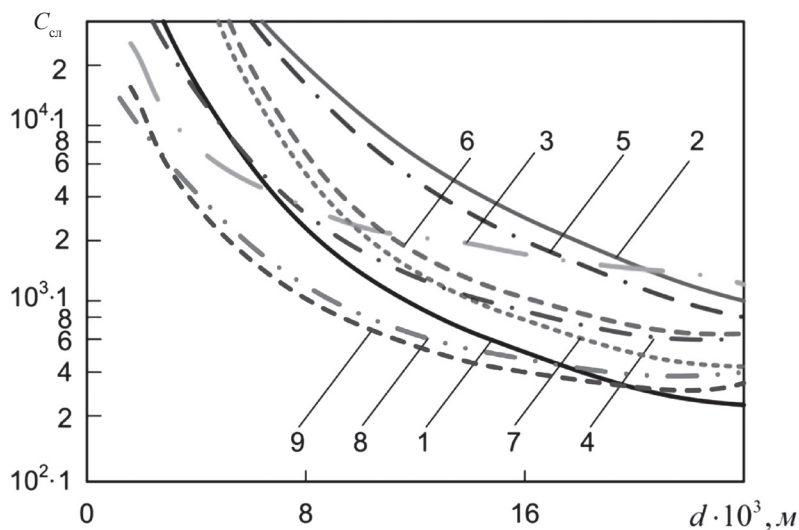


Рис. 1. Зависимость приведенного коэффициента $C_{сл}$ от размера частиц; цифры у кривых соответствуют номерам формул в табл. 1

Эквивпропорциональность приведенных коэффициентов $C_{сл}$ для частиц разной формы

Отношение	Значения отношений при $d_{ср}$, мм							Среднее значение
	8	10	12	14	16	18	20	
$C_{сл.4}/C_{сл.1}$	1,24	1,27	1,29	1,30	1,30	1,30	1,30	1,27
$C_{сл.5}/C_{сл.1}$	3,55	3,46	3,43	3,39	3,37	3,35	3,33	3,44
$C_{сл.2}/C_{сл.1}$	4,57	4,52	4,47	4,42	4,39	4,35	4,31	4,44

Результаты расчета коэффициента $C_{сл}$ по формуле (3) (см. табл. 1) выше, чем по формулам (7)–(9), в 1,5–2,0 раза. Характер зависимости $C_{сл}$ от порозности по формуле (3) резко отличается от той, которая определяется всеми другими формулами. Это можно объяснить только спецификой гидравлических свойств слоя из восстановленных окатышей.

К такому же выводу можно прийти, рассматривая на рис. 2 зависимости гидравлического сопротивления слоя окатышей высотой 1 м от скорости фильтрации. Видно, что при диаметре окатышей 11,0–11,5 мм кривая 1 (восстановленные окатыши) проходит выше на 50–100 % (при $w_r = 0,5–1,0$ м/с), чем кривые по данным других авторов. Из рис. 2 и табл. 3, в которой содержатся пояснения к рис. 2, видно, что данные авторов [1–3], полученные на сухих и обожженных окатышах из отечественных [1, 2] и зарубежных [3] концентратов, весьма близки между собой. Резкое расхождение кривой 1 с кривыми 2–4 на рис. 2 и еще более резкое расхождение кривой 3 с кривыми 7–9 (рис. 1) приводит к необходимости исключения результатов, полученных для восстановленных окатышей, из дальнейшего рассмотрения.

Для выявления общих закономерностей зависимости гидравлического сопротивления слоя от температуры t_r , скорости фильтрации w_r были проведены расчеты коэффициента $C_{сл}$ по формулам тех же авторов при $d = 14$ мм, $w_r = 0,6$ м/с, $t_r = var$ (результаты приведены на рис. 3, а) и при $d = 14$ мм, $t_r = 0$ °С, $w_r = var$ (результаты приведены на рис. 3, б). Из рис. 3, а видно, что величина $C_{сл}$ зависит от t_r довольно слабо и при изменении t_r от 0 до 1000 °С возрастает не более чем на 40...60 % (в среднем ~50 %).

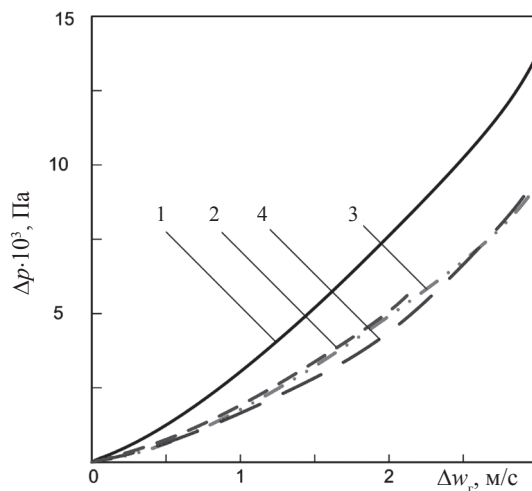


Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления слоя окатышей высотой 1 м от скорости фильтрации (пояснения см. в табл. 3):

1 – для восстановленных окатышей; 2 – по данным работы [3]; 3 – по данным работы [1]; 4 – по данным работы [2]

Пояснения к рис. 2

Номер кривой на рис. 2	Концентрат	Фракция, мм	d_{cp} , мм	Метод расчета d_{cp}	Вид окатышей	m	Метод получения зависимости $\Delta p = f(w)$	C_{cl}	Источник
1	Тула-чермет	$11,5 \pm 10\%$	11,5	Среднестатистический	Восстановленные	0,41	Эксперимент	—	—
2	Зарубежный	9,5...12,5	10,94	Среднеобъемный	Обожженные в лаборатории	0,408	Эксперимент	—	[12]
3	ЮГОК	—	11,3	Не указан	Сухие и обожженные в лаборатории	0,317*	Расчет** по формуле (2)	$\frac{1}{2d_{cp}} \frac{100}{Re_{cl}^{0,214}}$	[1]
4	ССГОК	10...12,5	11,3	Средневзвешенный	Сухие	0,449	—	840	[2]

* По [1] соответствует $d_{cp} = 12$ мм; ** расчет произведен авторами статьи.

Авторы работы [7] считают, что при расчете гидравлических сопротивлений слоя зависимость C_{cl} от t_r можно не учитывать (штриховые линии 6, 7 на рис. 3, а). В среднем можно рекомендовать зависимость

$$C_{cl}(t) = C_{cl(0)}(1 + 0,5t_r 10^{-3}), \quad (5)$$

где $C_{cl(0)}$ – приведенный коэффициент гидравлического сопротивления при $t_r = 0$. При температурах $t_e < 500$ °С величина C_{cl} растет с повышением температуры относительно быстрее, чем при $t_r > 500$ °С.

Из рис. 3, б видно, что величина C_{cl} наиболее сильно зависит от скорости фильтрации при $w_r < 1,0$ м/с, причем с уменьшением w_r происходит все более быстрое возрастание коэффициента C_{cl} . При изменении w_r от 0,3 до 1,5 м/с различие в величине C_{cl} может быть в 30–40 % (авторы работ [2, 7] пренебрегают этими различиями – см. штриховые линии 6, 7 на рис 3, б). Следует отметить тот факт, что кривые 8, 9 при увеличении w_r приближаются к линии 7 ($C_{cl7} = \text{const}$). При скорости $w_r = 3$ м/с величины коэффициентов C_{cl} , рассчитанные по формулам (7)–(9), будут соответственно равны $C_{cl7} = 632$, $C_{cl8} = 636$, $C_{cl9} = 608$ м⁻¹, т.е. различие не превышает 4 %. Сравнение не совсем законно, потому что авторы работы [1] ограничивают область применения своей формулы $w_r < 1,65$ м/с. Но с учетом рис. 3, б можно заключить, что с возрастанием скорости фильтрации формулы (7)–(9) согласуются значительно лучше. Особенно хорошо при $w_r = 3$ м/с совпадают величины C_{cl7} и C_{cl8} , хотя при $w_r = 0,3$ м/с они различаются на 60 %. Причина этого

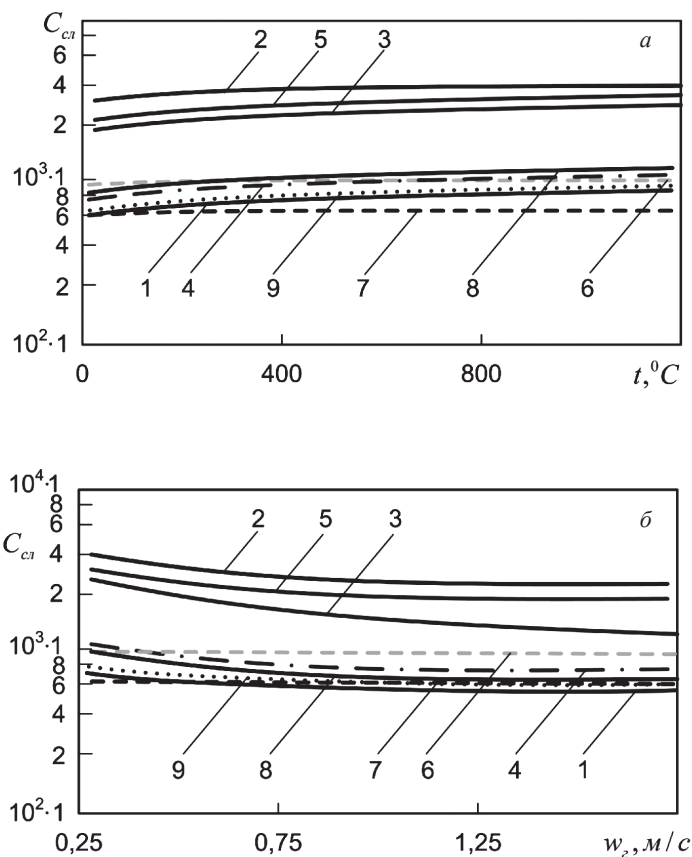


Рис. 3. Зависимости приведенного коэффициента $C_{сл}$ от температуры воздуха (а) и скорости фильтрации (б); цифры у кривых соответствуют номерам формул в табл. 1

кроется в том, что по формуле (7) (соответствует с точностью $\pm 5\%$ графику на рис. 2 [2]) коэффициенты $C_{сл7}$ получаются заниженными, так как соответствуют скоростям фильтрации 2...3 м/с, а в действительности коэффициенты $C_{сл}$ с уменьшением скорости фильтрации растут и довольно существенно. Это подтверждают исследования многих авторов, в том числе авторов зависимости (7) [2].

На рис. 4 показаны результаты расчета коэффициента $C_{сл}$ по данным работы [4] при скоростях фильтрации 2, 3 и 4 м/с в зависимости от размера окатышей. Видно, что величина $C_{сл}$ слабо зависит от скорости фильтрации лишь при $w_r > 3$ м/с (относительная разность $C_{сл}$ при $w_r = 3$ и 4 м/с уже сравнительно невелика). При этом с увеличением скорости фильтрации величина коэффициента $C_{сл}$ становится ниже. Поэтому зависимостью коэффициента $C_{сл}$ от размера d , по данным авторов работы [2], при скоростях $w_r < 2$ м/с пользоваться нельзя, так как при этом получаются заниженные значения $C_{сл}$.

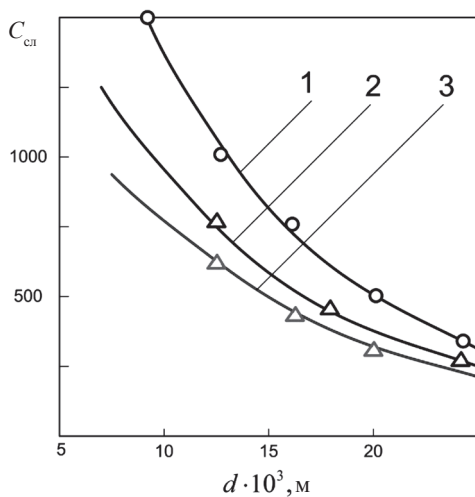


Рис. 4. Зависимость приведенного коэффициента $C_{сл}$ от размера окатышей при $w_r = 2$ (кривая 1), 3 (кривая 2) и 4 м/с (кривая 3); по данным работы [4]

Это было видно уже на рис. 2, где кривая 4 при скоростях $w_r < 1$ м/с проходит существенно ниже, чем, например кривая 3.

Более отчетливо, чем на рис. 2, расхождение результатов, по данным авторов исследований [1, 2], видно из табл. 4, где приведены расчеты величины гидравлического сопротивления в соответствии с расчетными вы-

ражениями этих исследований для слоя с параметрами $d = 11,3$ мм, $H = 1$ м, $t_r = 0$ °C, $w_r = var$ (позициям 1, 2 табл. 4 соответствуют кривые 3, 4 на рис. 2). Как видно из табл. 4, занижение величины Δp по [2] при $w_r = 0,4 \dots 0,8$ м/с достигает 25...35 %. При этом причина этих расхождений не в том, что опытные данные работ [2; 7] не подтверждают увеличения $C_{сл}$ при уменьшении w_r . В табл. 5 приведены результаты расчета $C_{сл}$ по

Таблица 4

Сравнение величины гидравлического сопротивления слоя при расчете по формулам [1, 2] ($H = 1$ м, $d = 11,3$ мм)

№ п/п	Расчетные выражения	Значения Δp , Па при w_r , м/с							Источ-ник
		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	2,0	
1	$\Delta p_1 = \frac{100}{Re_{сл}^{0,214}} \frac{\rho_r w_r^2}{2d_{ср}}$	77	261	540	904	1345	1860	4640	[1]
2	$\Delta p_2 = 840 \rho_r w_r^2$	44	173	390	693	1083	1560	4330	[2]
3	$100(\Delta p_1 - \Delta p_2) / \Delta p_1, \%$	43	34	28	23	19	16	7	—

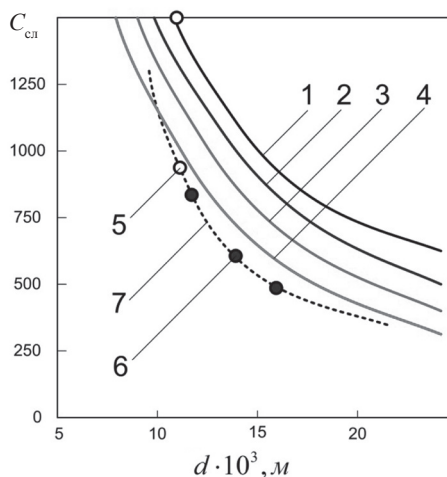
Таблица 5

Сравнение приведенных коэффициентов $C_{сл}$ при расчете по опытным данным [10] и по формуле (8) [1]

Расчетные выражения	$C_{сл}$ при w_r , м/с					Источник
	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	
$C_{сл} = \Delta p / \rho_r w_r^2$	1300*	1160	1020	970	990	[12]
$C_{сл} = \frac{1}{2d_{ср}} \frac{100}{Re_{сл}^{0,214}}$	1315	1130	1040	980	895	[1]

*Найдено с помощью аппроксимации.

Рис. 5. Зависимость приведенного коэффициента $C_{сл}$ от размера окатышей при $w_r = 0,25$ (1); 0,50 (2,5); 1,00 (3) и 2,00 м/с (4,6); кр. 1...4 – расчет по данным [1]; 5 и 6 – расчет по данным [3] (светлые точки) и [12] (черные точки); 7 – данные работы [2]



опытным данным (рис. 3) [10], которые используются в работах [2, 7], и по формуле (8). Совпадение результатов очень хорошее, хотя авторы работ [2, 7] получили по этим данным значение $C_{сл} = 981 \text{ м}^{-1}$, соответствующее $w_r \approx 2 \text{ м/с}$, т.е. заниженное для малых значений w_r .

На рис. 5 даны результаты расчета коэффициента $C_{сл} = f(d)$ по формуле (8) [1] для скоростей фильтрации 0,25, 0,50, 1,0 и 2,0 м/с. Для сравнения на графике нанесен ряд значений величины $C_{сл}$ для окатышей по данным работы [2] и рассчитанных по экспериментальным данным исследований [3; 12]. Данные работы [2] хорошо совпадают (несколько ниже) в диапазоне $d = 10...20 \text{ мм}$ с данными исследования [1] при скорости фильтрации $w_r = 2 \text{ м/с}$. При $d = 10,56 \text{ мм}$ расчеты по данным опытной зависимости $\Delta p = f(w_r)$ [12] хорошо совпадают с расчетом по [1]. Данные работы [3] при $d = 11 \text{ мм}$ хорошо совпадают с результатами расчета по [1] при $w_r = 2 \text{ м/с}$ и несколько хуже при $w_r = 0,5 \text{ м/с}$. Все это указывает на отсутствие противоречий данных работы [1] с результатами других исследований. Данные работы [2] при $w_r \geq 2,0 \text{ м/с}$, $d = 10...20 \text{ мм}$ хорошо совпадают с результатами других исследователей, однако при низких значениях скорости фильтрации (особенно при $w_r < 1 \text{ м/с}$) дают заниженные значения гидравлического сопротивления слоя (на 25...40 %) и в дальнейшем здесь не используются.

Таким образом, для расчета гидравлического сопротивления слоя окатышей остаются формулы (8) [1] и (9) [11]. Диапазоны применения формулы (9) [11] авторы ограничивают по скорости фильтрации диапазоном $w_r = 0,53...1,65 \text{ м/с}$, по размеру окатышей – диапазоном $d = 10...20 \text{ мм}$. Для достижения конечного результата данного исследования эти ограничения слишком узки. Авторы работы [1] указывают, что проводили свои опыты при изменении скорости фильтрации почти от 0 до 4...5 м/с с окатышами размером 8...30 мм и никаких дополнительных ограничений на применимость формулы (8) не ввели. Результаты расчетов величины $\zeta_{сл}$ (или $C_{сл}$) при $Re_{сл} = 200...2000$ (область применимости формулы (9)) [11] по формулам (8) и (9) совпадают с точностью до 10...20 %, хотя результаты по формуле (9) систематически ниже, что можно объяснить более низкой порозностью окатышей в опытах работы [11]. В дальнейшем предпочтение отдается формуле (8) [1] из-за отсутствия узких ограничений по ее применению. В результате проведенного анализа приходим к выводу о том, что коэффициент гидравли-

ческого сопротивления слоя окатышей $\zeta_{\text{сл}}$ при естественной засыпи в лабораторных условиях (при отсутствии значительного количества мелочи, т.е. критических по размеру фракций, отсутствии значительной сегрегации и пр.) достаточно надежно можно рассчитывать по формуле [1]:

$$\zeta_{\text{сл}} = 100 / \text{Re}_{\text{сл}}^{0,214}. \quad (6)$$

Выводы

С использованием коэффициентов гидравлического сопротивления проведены расчеты по определению гидравлического сопротивления плотного слоя, состоящего из частиц разной формы (шаровидные, куски произвольной формы, железорудные окатыши) по формулам ряда авторов. На основании анализа полученных результатов предложено выражение, позволяющее достаточно надежно рассчитывать гидравлические характеристики слоя окатышей, а, следовательно, оптимизировать как гидравлические, так и тепловые режимы обжига окатышей на ленте конвейерной машины.

Список использованных источников

1. Ровенский И.И., Бережной Н.Н. Исследование газопроницаемости слоя окатышей // Известия вузов. Черная металлургия, 1964. № 1. С. 27–32.
2. Кузнецов Р.Ф., Мерзляков Ю.И., Антуганова Г.М. Газопроницаемость неподвижного слоя железорудных окатышей: Сб. научных трудов ВНИИМТ «Теплотехника обжиговых и агломерационных машин конвейерного типа. Теплофизика сталеплавильных процессов». М.: Металлургия, 1969. № 18. С. 11–14.
3. Schultze H.J., Abel O. Durch Störung-verhalten von Formkoks-Erz-Stückkoks-Systemen // Arch. Eisenhüttenw., 1974. 45. – № 5. – S. 279–285.
4. Логинов В.И., Соломатин С.М., Корж А.Т. Газопроницаемость агломерата и окатышей // Металлургия и коксохимия. – Киев: Техника, 1970. – № 19. – С. 46–51.
5. Стефанович М.А., Сibaгатуллин С.К., Гуцин Д.Н. Закономерности движения шихты и газа в доменной печи: монография / под ред. д.т.н. С.К. Сibaгатуллина. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. – 161 с.
6. Гидравлический расчет трубопроводов и выбор тягодутьевых средств, обеспечивающих работу промышленных печей / С.Н. Гуцин, М.Д. Казяев, Е.В. Киселев, В.С. Шаврин, Б.П. Юрьев. – Екатеринбург: Изд-во Уральского фед. ун-та, 2011. – 140 с.
7. Чукин В.В., Кузнецов Р.Ф. Гидравлическое сопротивление неподвижного плотного слоя: Сб. научных трудов ВНИИМТ «Теплотехника подготовки металлургического сырья». – М.: Металлургия, 1969. – № 16. – С. 50–59.
8. Бернштейн Р.С., Померанцев В.В., Шагалова С.Л. Обобщенный метод расчета аэродинамического сопротивления загруженных сечений: Сб. «Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котельно-топочных процессах» (под ред. Г.Ф. Кнорре). – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. – С. 267–289.
9. Четкин А.В. Высокотемпературные теплоносители. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. 424 с.
10. Червоткин В.В., Минаев Ю.Е. Аэродинамическое сопротивление кусковой руды: Сб. научных трудов ВНИИМТ «Теплотехника подготовки металлургического сырья». – М.: Металлургия, 1969. – № 16. – С. 67–75.
11. Теплотехника окискования железорудного сырья / С.Г. Братчиков, Ю.А. Берман, Я.Л. Белоцерковский и др. – М.: Металлургия, 1970. – 343 с.
12. Чукин В.В., Кузнецов Р.Ф. Гидравлическое сопротивление неподвижного и подвижного слоев кусковых материалов: Сб. научных трудов ВНИИМТ «Обжиг руд, плавильные печи, нагрев и охлаждение стали». – Свердловск: ВНИИМТ, 1967. – № 17. – С. 26–33.